

DE4218599

Publication Title:

Navigation and guidance system for autonomous mobile robots - has sensors for input to neuronal network based controller that has learning capacity to determine direction and motion commands

Abstract:

A navigation and guidance system for use with mobile robot units uses inputs from a sensor (10) system mounted on the robot. This can be in the form of TV, radar or IR detectors. An additional sensor provides proximity or range information (12) and can be a laser unit.

Both sensor systems provide inputs to a navigation module (14) that is in the form of a neuronal network. The system has a learning capacity and is trained to generate direction and motion commands dependent upon the sensor inputs. The neuronal network is configured as 3 different types providing different classification categories.

USE/ADVANTAGE - Uses learning process to determine navigating actions.

Data supplied from the esp@cenet database - <http://ep.espacenet.com>



⑯ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑯ Offenlegungsschrift
⑯ DE 42 18 599 A 1

⑯ Int. Cl. 5:
G 05 D 1/02

DE 42 18 599 A 1

⑯ Aktenzeichen: P 42 18 599.8
⑯ Anmeldetag: 5. 6. 92
⑯ Offenlegungstag: 16. 12. 93

⑯ Anmelder:
Bodenseewerk Gerätetechnik GmbH, 88662
Überlingen, DE

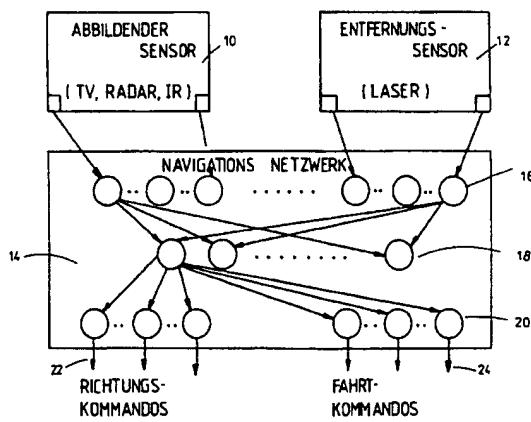
⑯ Vertreter:
Weisse, J., Dipl.-Phys.; Wolgast, R., Dipl.-Chem. Dr.,
Pat.-Anwälte, 42555 Velbert

⑯ Erfinder:
Krogmann, Uwe, 7770 Überlingen, DE

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑯ Navigations- und Führungssystem für autonome, mobile Roboter

⑯ Ein Navigations- und Führungssystem für autonome, mobile Roboter enthält einen bilderaffassenden Sensor (10), einen Entfernungssensor (12) und neuronale Netzwerkmittel (14; 26, 28, 30, 32), auf welche Daten von dem bilderaffassenden Sensor (10) und von dem Entfernungssensor (12) aufgeschaltet sind und welche zur Erzeugung von Richtungs- und Fahrtkommandos aus den Daten der Sensoren trainiert sind.



DE 42 18 599 A 1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 10. 93 308 050/36

8/45

Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Navigations- und Führungssystem für autonome, mobile Roboter.

Bei solchen autonomen, mobilen Robotern handelt es sich um autonome Systeme, die in der Lage sind, sich im Rahmen einer zielgerichteten Aufgabenstellung in einer Umgebung selbsttätig zu bewegen und zu orientieren. Darüberhinaus sollen sie die Fähigkeit besitzen, auf unvorhergesehene Ereignisse und Veränderungen in dieser Umgebung in einer Weise zu reagieren, daß die Ausführung der Aufgabe in Echtzeit weiter verfolgt werden kann.

Ein Teilaspekt dieser Problematik ist die Navigation und Führung des Roboters in der betreffenden Umgebung. Dazu gehört die Standortbestimmung, das Erkennen von Hindernissen und die Fahrwegplanung. Das ist mit herkömmlichen Rechnern praktisch nicht zu bewerkstelligen.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Navigations- und Führungssystem für mobile Roboter zu schaffen.

Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe gelöst durch einen bilderfassenden Sensor, einen Entfernungssensor und neuronale Netzwerkmittel, auf welche Daten von dem bilderfassenden Sensor und von dem Entfernungssensor aufgeschaltet sind und welche zur Erzeugung von Richtungs- und Fahrtkommandos aus den Daten der Sensoren trainiert sind.

Der mobile Roboter enthält einen bilderfassenden Sensor und einen Entfernungssensor. Diese Sensoren liefern Informationen über die Umgebung, in welcher sich der mobile Roboter bewegt. Sie gestatten dem Roboter, seinen Standort zu bestimmen und Hindernisse zu erkennen. Durch die neuronalen Netzwerkmittel wird der Roboter in die Lage versetzt, sich selbst zu organisieren, zu lernen sowie sich an unvorhergesehene, veränderliche Situationen in seiner Umgebung anzupassen. Der Roboter kann seinen Fahrweg planen und optimieren und seine Bewegungen dementsprechend regeln.

Ausgestaltungen der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche.

Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung ist nachstehend unter Bezugnahme auf die zugehörigen Zeichnungen näher erläutert.

Fig. 1 ist ein Blockdiagramm und zeigt die Sensor-Netzwerk-Architektur bei einem Navigations- und Führungssystem für mobile Roboter.

Fig. 2 zeigt den Aufbau des neuronalen Netzwerkes zur Bestimmung eines Soll-Fahrweges.

Fig. 3 zeigt einen als neuronales Netzwerk ausgebildeten Führungsregler bei einem Navigations- und Führungssystem für mobile Roboter.

Fig. 4 zeigt die Architektur für das Trainieren des neuronalen Netzwerkes.

Fig. 5 ist das Ergebnis einer Simulation und zeigt, wie der mobile Roboter einem vorher trainierten Fahrweg folgt.

Fig. 6 ist ebenfalls das Ergebnis einer Simulation ähnlich Fig. 5 und zeigt, wie der mobile Roboter einen vorher nicht trainierten Weg sucht.

Fig. 1 zeigt die grundlegende Sensor-Netzwerk-Architektur eines Navigations- und Führungssystems für mobile Roboter. Der mobile Roboter enthält einen bilderfassenden Sensor 10. Das kann ein Videosensor, ein Radarsensor oder ein Infrarotsensor sein. Der Sensor 10 liefert Pixel, die ein Bild des von dem Sensor erfaßten

Gesichtsfeldes darstellen. Der bilderfassende Sensor kann z. B. eine Pixelmatrix mit 32×32 Pixeln liefern. Weiterhin enthält der mobile Roboter einen Entfernungssensor 12. Das kann ein Laser-Entfernungsmesser sein. Auch der Entfernungssensor ist "bilderfassend" in dem Sinne, daß er die Entfernungen zu den verschiedenen Punkten des abgetasteten Gesichtsfeldes erfaßt und somit ein räumliches Profil liefert. Der Laser Entfernungsmesser kann beispielsweise 8×32 Pixel liefern. Die Ausgangsdaten des bilderfassenden Sensors 10 und des Entfernungssensors 12 sind auf ein neuronales Netzwerk 14 geschaltet. Das neuronale Netzwerk 14 ist ein dreischichtiges Netzwerk mit einer Eingangsschicht 16, einer "verborgenen" Schicht 18 und einer Ausgangsschicht 20. Das neuronale Netzwerk ist ausschließlich vorwärts vernetzt. Es enthält keine Verbindungen innerhalb einer Schicht und keine Rückführungen. Dadurch ist die Stabilität des Netzwerkes gewährleistet. Das neuronale Netzwerk 14 liefert nach geeignetem Training an einem Ausgang 22 Richtungskommandos und an einem Ausgang 24 Fahrtkommandos zur Bestimmung der Fahrtrichtung und Geschwindigkeit des mobilen Roboters.

Diese Information wird in einem neuronalen Führungssystem des mobilen Roboters weiterverarbeitet.

Das Netzwerk 14 wird überwacht trainiert mit realen oder simulierten Szenen oder Umgebungsdaten. Das Training erfolgt mit Hilfe des "Backpropagation"-Algorithmus.

Bei einfachen mobilen Robotern können die Richtungs- und Fahrtkommandos, wie sie von dem neuronalen Netz 14 ausgegeben werden, direkt auf Stellglieder des Roboters aufgeschaltet werden. Das ist insbesondere möglich, wenn es sich um Einsätze in weitgehend strukturierter Umgebung handelt. Mobile Roboter für Einsätze in unstrukturierter und möglicherweise nichtkooperativer Umgebung erfordern eine Struktur des Führungssystems, wie sie in Fig. 2 dargestellt ist.

Die Netzwerkmittel enthalten dort ein erstes neuronales Netzwerk 26. Auf das neuronale Netzwerk 26 sind die Daten von dem bilderfassenden Sensor 10 und dem Entfernungssensor 12 aufgeschaltet. Das neuronale Netzwerk 26 ist so trainiert, daß es die Daten des bilderfassenden Sensors 10 und des Entfernungssensors 12 zunächst strukturiert. Es werden Merkmale, Cluster, Kategorien etc. extrahiert. Hierzu werden als Netzwerkstrukturen selbstorganisierende Merkmalskarten und adaptive Resonator-Technologien verwendet.

Die so strukturierten Daten werden in einem zweiten neuronalen Netzwerk 28 einem Klassifikationsprozeß unterworfen. Das Netzwerk 28 ist ein "Backpropagation"-Netzwerk oder ein "Assoziativspeicher"-Netzwerk.

Basierend auf den Ergebnissen der Datenstrukturierung und der Klassifikation werden durch ein weiteres neuronales Netzwerk 30 mögliche Fahrwege generiert. Aus diesen Fahrwegen wird ein optimaler Fahrweg ausgewählt. Für diese Optimierungsaufgabe wird als Netzwerk 30 ein "Hopfield"-Netzwerk verwendet. Das Netzwerk 30 liefert als Ergebnis der Fahrweg-Planung einen Soll-Fahrweg für das jeweils aktuelle Planungsintervall. Ein solcher Soll-Fahrweg kann beschrieben werden durch drei zeitabhängige Variablen $X(t)$, $Y(t)$ und $\Psi(t)$, wobei $X(t)$ die Nord-Positionskoordinate, $Y(t)$ die Ost-Positionskoordinate und der Winkel $\Psi(t)$ die Richtung der Bezugsachse des mobilen Roboters in dem Navigationsreferenzsystem des Einsatzgebietes angibt. Diese Daten des Soll-Fahrwegs können in einem Soll-Zu-

standsvektor $\underline{Z}_D(t)$ zusammengefaßt werden:

$$\underline{Z}_D(t) = [X_D(t), Y_D(t), \alpha_D(t)]^T.$$

Fig. 3 zeigt nun einen ebenfalls mit einem neuronalen Netzwerk 32 ausgebildeten Regler 33, der den mobilen Roboter 34 längs des so vorgegebenen Soll-Fahrweges führt. Das Netzwerk 32 ist ein mehrschichtiges "Feed-forward"-Netzwerk mit einer Eingangsschicht 34, einer "verborgenen" Schicht 36 und einer Ausgangsschicht 38. Auf das Netzwerk 32 werden die zeitabhängigen Komponenten des Soll-Zustandsvektors $\underline{Z}_D(t)$ in Form diskreter, mit einer Abtastperiode T abgetasteter Werte $\underline{Z}_D(nT)$ aufgeschaltet. Die Abtastung des Soll-Zustandsvektors $\underline{Z}_D(t)$ ist in Fig. 3 durch einen Schalter 40 dargestellt. Die abgetasteten diskreten Werte werden durch Verzögerungsglieder 42, 44 ... nacheinander um jeweils eine Abtastperiode T verzögert und auf das neuronale Netzwerk 32 aufgeschaltet. Es liegt dann an einem ersten Eingang 46 des neuronalen Netzwerkes 32 der Soll-Zustandsvektor $\underline{Z}_D(nT)$ zum Zeitpunkt nT . An einem zweiten Eingang 48 des neuronalen Netzwerkes 32 liegt der Soll-Zustandsvektor $\underline{Z}_D((n-1)T)$, der dem Abtastzeitpunkt $(n-1)T$ zugeordnet ist, usw. An einem Eingang 50 liegt schließlich der Soll-Zustandsvektor $\underline{Z}_D((n-k)T)$. Das neuronale Netzwerk erhält somit an seinen Eingängen 46 ... 50 sämtliche Soll-Zustandsvektoren für ein "Planungsintervall" der Länge kT . Das Netzwerk 32 liefert an einem Ausgang 52 zum Zeitpunkt nT einen Stellvektor $\underline{u}(nT)$.

Der Regler 33 enthält eine Rückführschleife 54. Der Stellvektor $\underline{u}(nT)$ wird über Verzögerungsglieder 56, 58 ... um jeweils eine Abtastperiode T verzögert auf weitere Eingänge 60 ... 62 des neuronalen Netzwerkes 32 geschaltet. Der Eingang 60 erhält den Stellvektor $\underline{u}((n-1)T)$. Der Eingang 60 erhält schließlich den Stellvektor $\underline{u}((n-l)T)$.

Der Stellvektor ist

$$\underline{u}(t) = [v(t), \alpha(t)]^T.$$

Der Stellvektor $\underline{u}(t)$ enthält somit die Komponenten Fahrgeschwindigkeit $v(t)$ und Stellung $\alpha(t)$ des Fahrtrichtungsgebers. Dieser Stellvektor ist auf die Stellglieder des mobilen Roboters 34 aufgeschaltet. Der mobile Roboter 34 folgt dann einem Fahrweg, der durch einen Ist-Zustandsvektor $\underline{Z}(t)$ gekennzeichnet ist und dem durch den Soll-Zustandsvektor $\underline{Z}_D(t)$ vorgegebenen optimalen Fahrweg entspricht.

Fig. 4 veranschaulicht das Trainieren des Netzwerkes 32 des Reglers 33.

Auf den mobilen Roboten 34 oder ein nichtlineares Modell dieses mobilen Roboters werden in festen Abtastperioden Stellvektoren $\underline{u}(nT)$ aufgeschaltet. Diese Stellvektoren ergeben sich durch Abtastung eines zeitabhängigen Stellvektors $\underline{u}(t)$. Diese Abtastung ist durch einen Schalter 64 symbolisiert. Der mobile Roboter 34 (oder das Modell des mobilen Roboters) folgt dann einem Fahrweg, der durch einen zeitabhängigen Zustandsvektor $\underline{Z}(t)$ beschrieben wird. Der Zustandsvektor $\underline{Z}(t)$ wird wieder mit den festen Abtastperioden T abgetastet. Diese Abtastung ist durch einen Schalter 66 angedeutet. Die so erhaltenen Zustandsvektoren werden durch Verzögerungsglieder 68, 70, ... um jeweils eine Abtastperiode T verzögert und auf Eingänge 72, 74, ... 76 des neuronalen Netzes 32 geschaltet. An dem Eingang 72 liegt dann der Zustandsvektor $\underline{Z}(nT)$, der dem Abtastzeitpunkt nT zugeordnet ist. An dem Ein-

gang 74 liegt der Zustandsvektor $\underline{Z}((n-1)T)$, der dem Abtastzeitpunkt $(n-1)T$ zugeordnet ist. An dem Eingang 76 liegt schließlich der Zustandsvektor $\underline{Z}((n-k)T)$, der dem Abtastzeitpunkt $(n-k)T$ zugeordnet ist.

In einer Schleife 78 entsprechend der Rückführschleife 54 in Fig. 3 ist der eingegebene Stellvektor $\underline{u}(nT)$ mit stufenweiser Verzögerung auf Eingänge des neuronalen Netzwerkes 32 geschaltet. Die stufenweise Verzögerung wird durch Verzögerungsglieder 80, 82, ... bewirkt. An einem Eingang 84 liegt der eingegebene Stellvektor $\underline{u}((n-1)T)$. An einem Eingang 86 liegt schließlich der eingegebene Stellvektor $\underline{u}((n-1)T)$.

Das neuronale Netzwerk 32 liefert an einem Ausgang 88 einen Schätzwert $\underline{q}(nT)$ für den Stellvektor. Dieser Schätzwert weicht zunächst von dem eingegebenen Stellvektor $\underline{u}(nT)$ ab. Es wird in einem Summierpunkt 90 die Differenz von eingegebenem Stellvektor und Schätzwert gebildet. Diese Differenz ist auf einen Lern-Algorithmus 92 geschaltet. Der Lern-Algorithmus 92 ist ein "Backpropagation"-Algorithmus. Durch diesen Algorithmus werden die Verbindungsgewichte w_{ij} des neuronalen Netzwerkes schrittweise verändert. Diese Veränderung geschieht in einer solchen Weise, daß nach einer Vielzahl von Lernschritten das neuronale Netzwerk den Zusammenhang zwischen eingegebenen Zustandsvektoren \underline{Z} und Stellvektoren \underline{u} korrekt wieder gibt. Die Veränderung der w_{ij} ist durch einen Pfeil 94 angedeutet.

Fig. 5 zeigt das Ergebnis einer Simulation der Bewegung eines mobilen Roboters, der mit einem Regler 33 der beschriebenen Art, der gemäß Fig. 4 trainiert wurde, längs eines vorgegebenen, durch einen Soll-Zustandsvektor definierten Soll-Fahrweges geführt wird. Die ausgezogenen Linien zeigen den Soll-Fahrweg, die gepunkteten Linien zeigen den Ist-Fahrweg. Fig. 5 zeigt den Fall, daß die vorgegebenen Fahrwege selbst vorher trainiert worden waren. Fig. 6 ist eine entsprechende Darstellung für den Fall, daß die vorgegebenen Fahrwege selbst nicht trainiert worden waren. Das unerwartet gute Verhalten des Netzwerkes liegt an der generalisierenden Wirkung der hier verwendeten Struktur des Netzwerkes.

Patentansprüche

1. Navigations- und Führungssystem für autonome, mobile Roboter, gekennzeichnet durch einen bild erfassenden Sensor (10), einen Entfernungssensor (12) und neuronale Netzwerkmittel (14; 26, 28, 30, 32), auf welche Daten von dem bild erfassenden Sensor (10) und von dem Entfernungssensor (12) aufgeschaltet sind und welche zur Erzeugung von Richtungs- und Fahrtkommandos aus den Daten der Sensoren trainiert sind.
2. Navigations- und Führungssystem nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Netzwerk (14) drei Schichten (16, 18, 20) enthält und ausschließlich vorwärts vernetzt ist.
3. Navigations- und Führungssystem nach Anspruch 1 gekennzeichnet durch
 - a) ein erstes neuronales Netzwerk (26) dessen Netzwerkarchitektur selbstorganisierenden Merkmalskarten oder adaptive Resonator Technologien verwendet zum Strukturieren der Sensordaten mit dem Ziel, Merkmale, Cluster, Kategorien etc zu extrahieren,
 - b) ein zweites neuronales Netzwerk (28) vom Typ "Backpropagation" oder "Assoziativspei-

cher" auf welches strukturierte Ausgangsdaten des ersten neuronalen Netzwerkes (26) aufgeschaltet sind zur Durchführung eines Klassifikationsprozesses mit den strukturierten Daten, und

5

c) ein drittes neuronales Netzwerk (30) vom "Hopfield"-Typ zur Generierung möglicher Fahrwege des mobilen Roboters (34) und einer Optimierung des Fahrweges basierend auf dem Ergebnis der Strukturierung der Daten 10 und der Klassifikation, wobei der optimierte Fahrweg durch einen soll-Zustandsvektor ($Z_D(t)$) dargestellt ist.

4. Navigations- und Führungssystem nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß der Soll-Zustandsvektor ($Z_D(t)$) auf einem mit einem neuronalen Netz (32) aufgebauten Regler (33) aufgeschaltet ist, der Stellsignale ($u(t)$) für Fahrgeschwindigkeit und Fahrtrichtung erzeugt, derart daß der Zustandsvektor ($Z(t)$) des mobilen Roboters dem Soll-Zustandsvektor ($Z_D(t)$) folgt.

15

5. Navigations- und Führungssystem nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Regler (33) ein dreischichtiges neuronales Netzwerk (32) aufweist.

25

6. Navigations- und Führungssystem nach Anspruch 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, daß a) der zeitabhängige Soll-Zustandsvektor ($Z_D(t)$) durch Abtastmittel (40) in festen Abtastperioden (T) abtastbar ist, so daß abgetastete Soll-Zustandsvektoren ($Z_D(nT)$) erhalten und auf den Regler (33) aufgeschaltet werden, b) das neuronale Netzwerk (32) eine Mehrzahl von Eingängen (46, 48 ... 50) aufweist, die eine Reihe von einem ersten bis zu einem letzten Eingang (46 bzw. 50) geordnet sind, c) eine Mehrzahl von Verzögerungsgliedern (42, 44 ...) vorgesehen ist, die zwischen den Eingängen (46, 48, ... 50) des neuronalen Netzwerkes (32) liegen und jeweils eine Verzögerung um eine Abtastperiode bewirken, und d) die abgetasteten Soll-Zustandsvektoren ($Z_D(nT)$) auf den ersten Eingang (46) der Reihe aufschaltbar sind.

30

35

40

45

7. Navigations- und Führungssystem nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß a) der Regler (33) eine Rückführschleife (54) aufweist, über welche Stellvektoren ($u(nT)$) auf weitere Eingänge (60, ... 62) aufschaltbar sind, die in einer Reihe von einem ersten (60) zu einem letzten Eingang (62) geordnet sind, b) eine Mehrzahl von Verzögerungsgliedern (56, 58, ...) vorgesehen sind, die in der Rückführschleife (54) vor und zwischen den weiteren Eingängen (60, ... 62) angeordnet sind und jeweils eine Verzögerung um eine Abtastperiode bewirken, und c) die Stellvektoren ($u(nT)$) jeweils auf das dem ersten Eingang (60) vorgeschaltete Verzögerungsglied (56) aufgeschaltet sind.

50

55

60

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

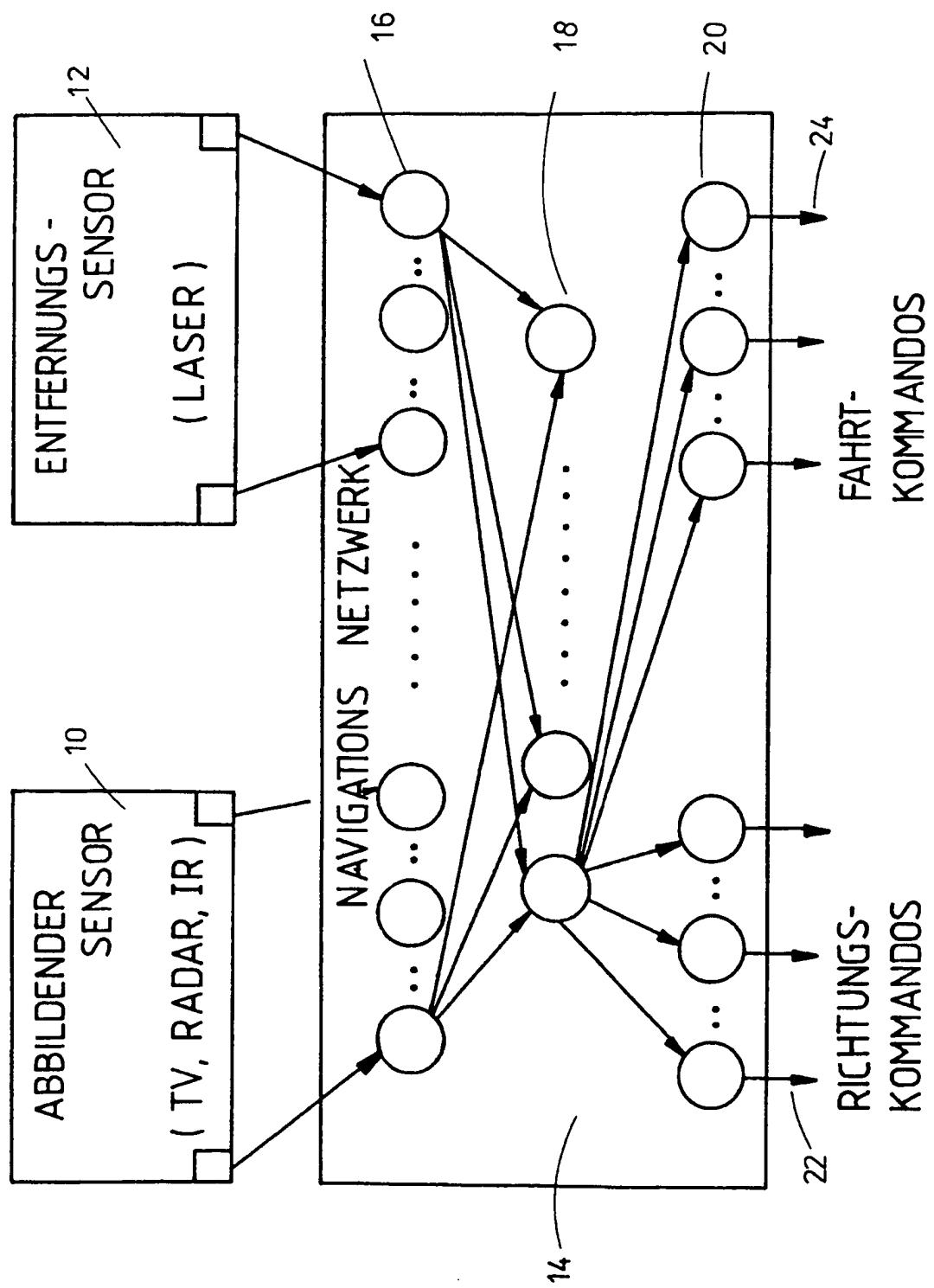


Fig. 1

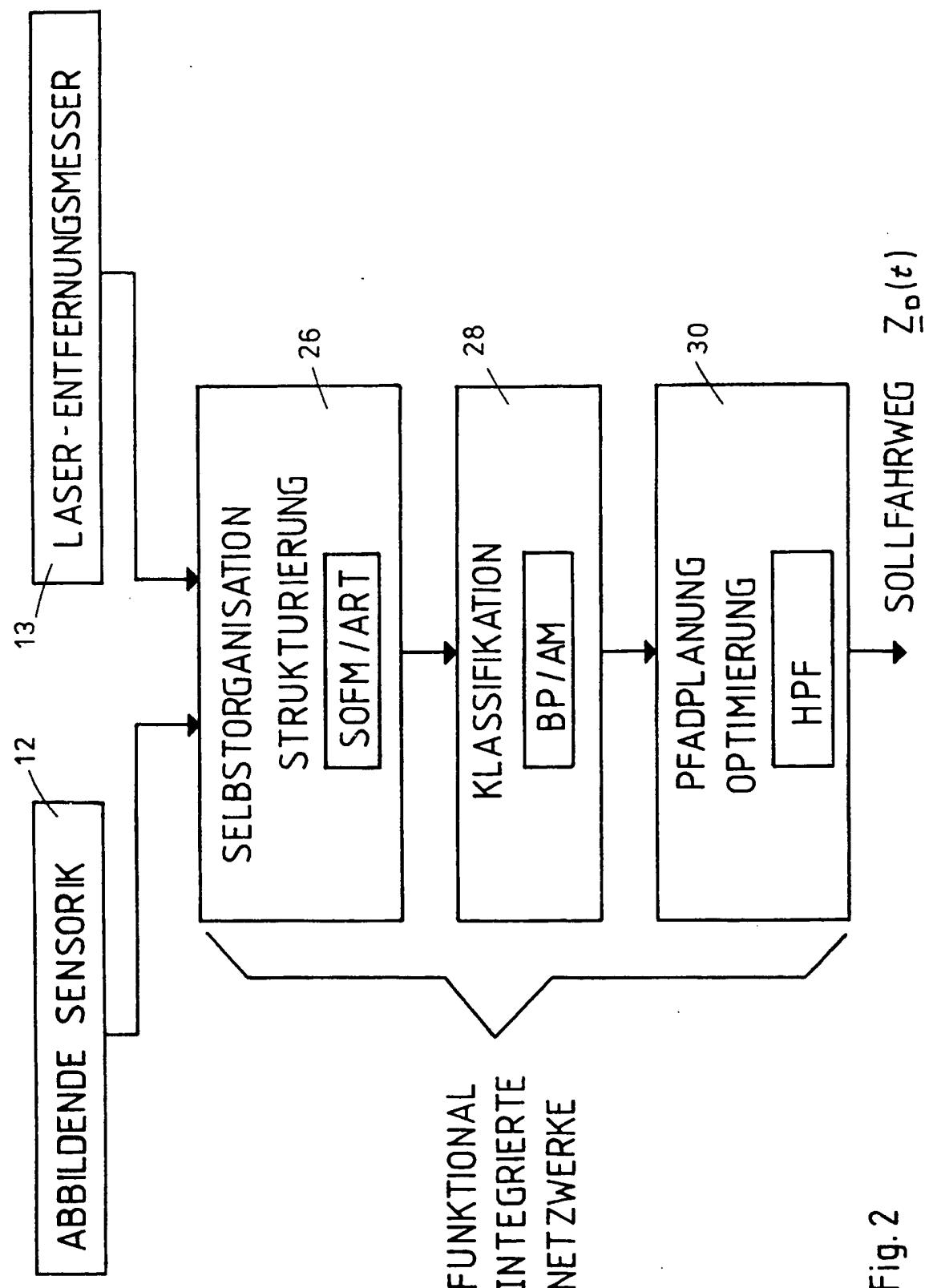


Fig. 2

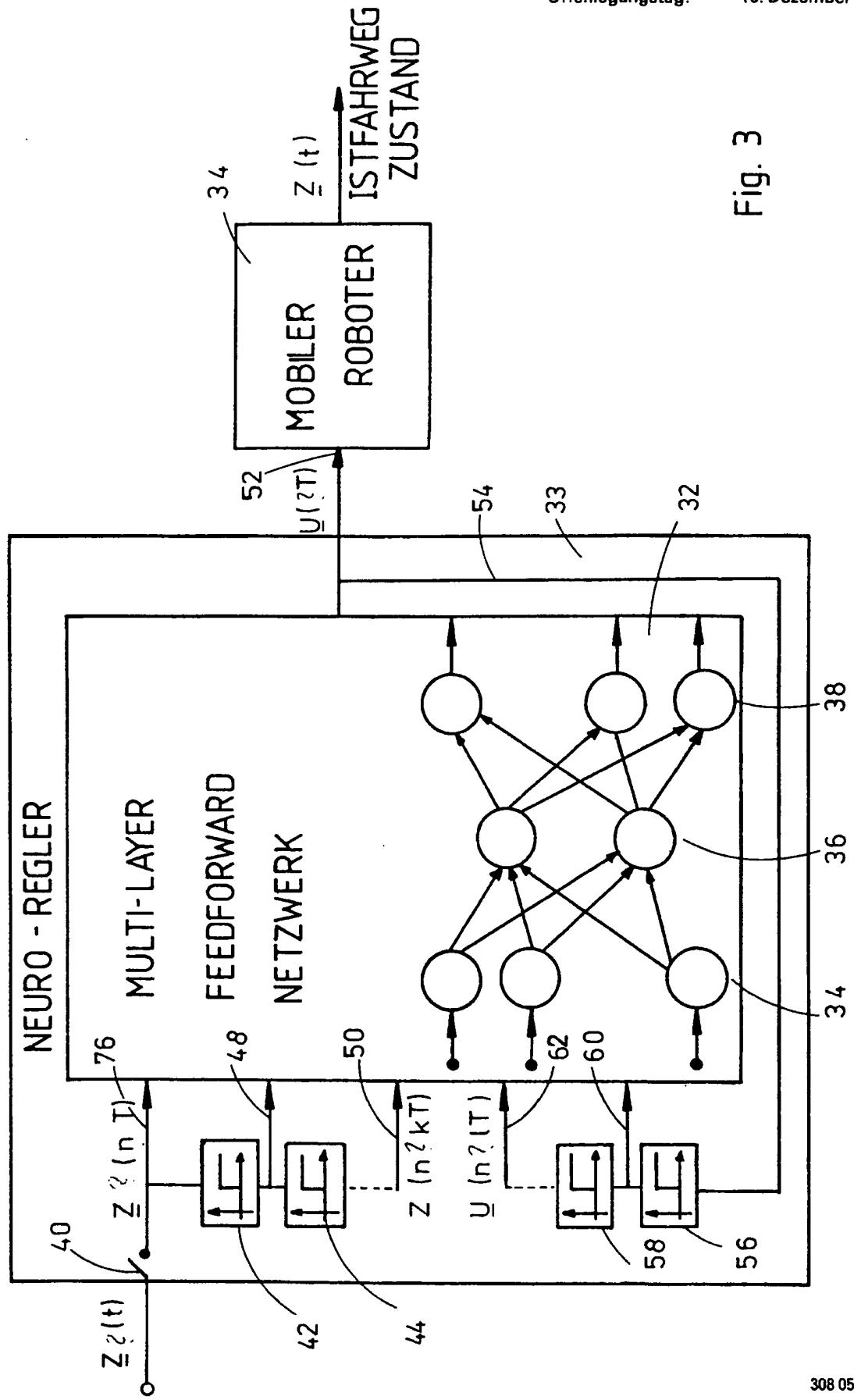


Fig. 3

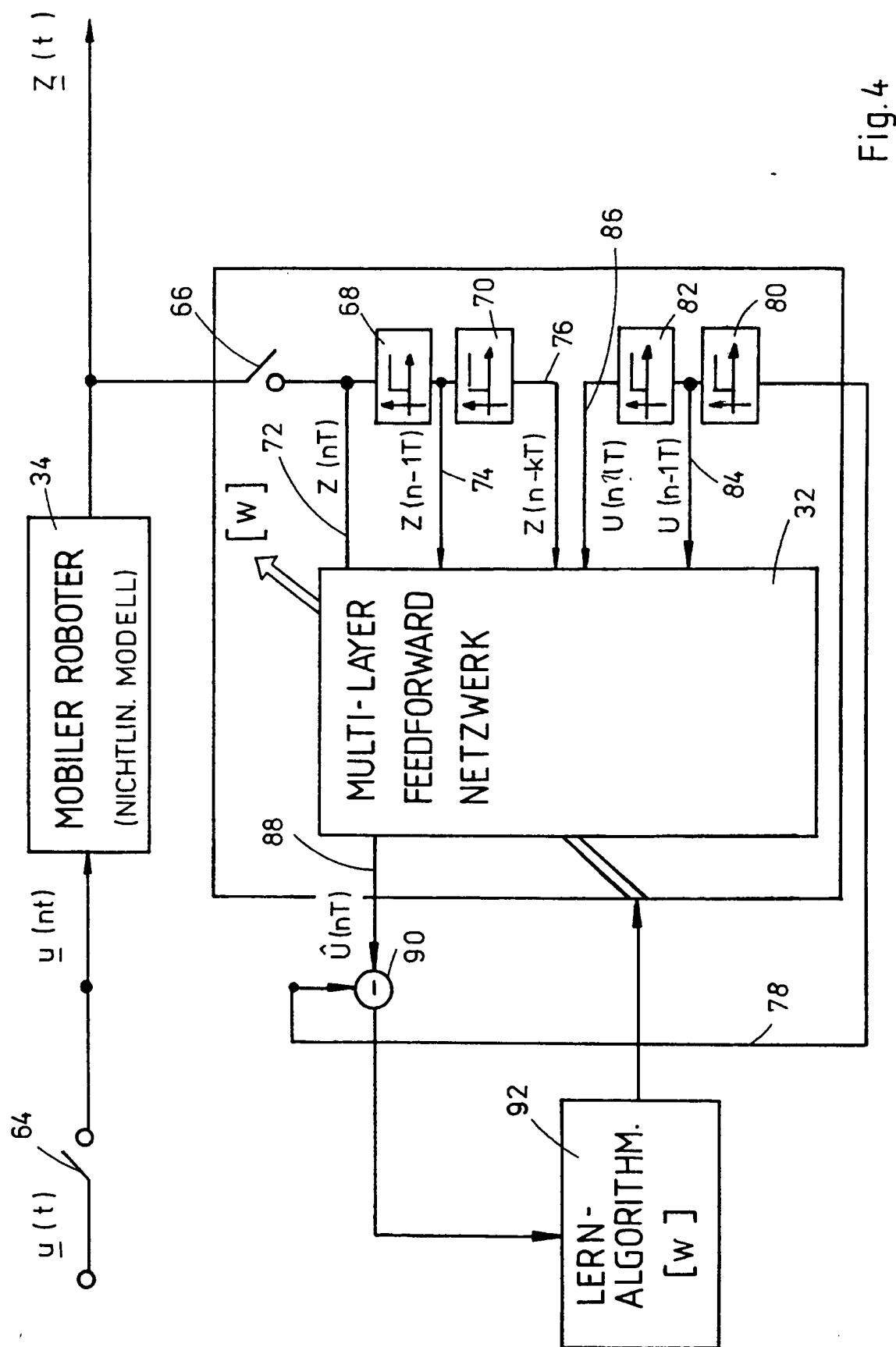
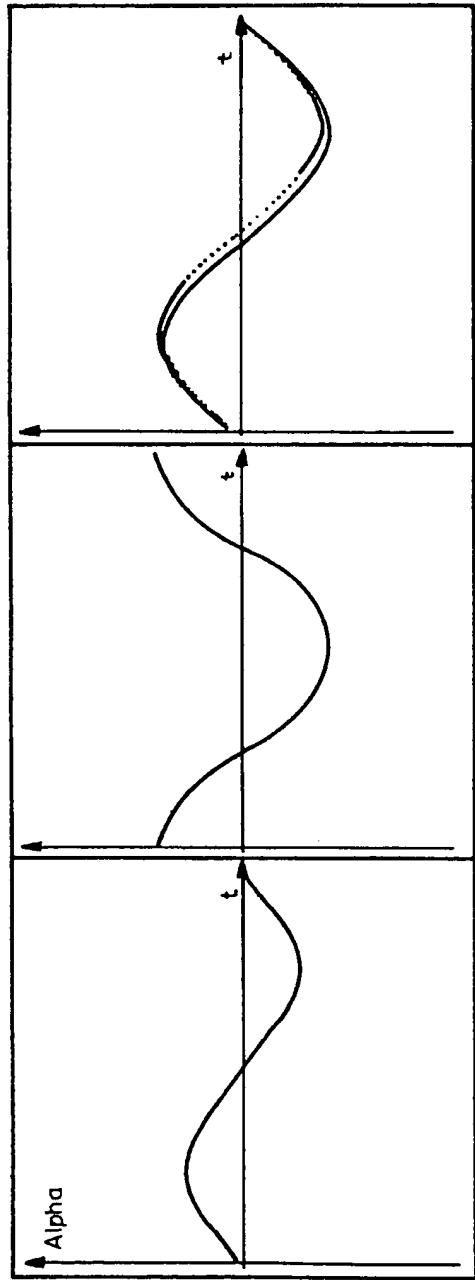


Fig. 4

TRAINED TRACKING



TEST TRACKING

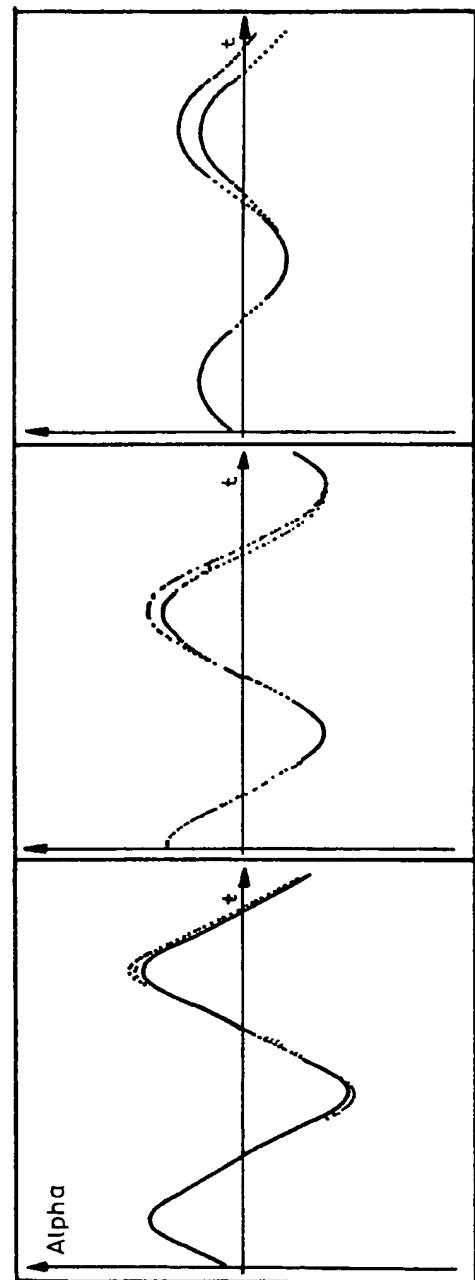


Fig. 5

Fig. 6